

## Posudek disertační práce

**Autor práce:** Ing. Vojtěch Kostih

**Název práce:** Zesilování železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou

**Studijní obor:** P3607 Stavební inženýrství (nD)

**Oponent:** prof. Ing. Juraj Bilčík, PhD.

Pohraničníkov 19, 851 10 Bratislava, SR, e-mail: juraj.bilcik@stuba.sk

**Datum zadání posudku:** 14.03.2018

### Aktuálnost tématu disertační práce

Dizertačná práce sa zaoberá aktuálnou problematikou zosilňovania betónových konštrukcií, ktoré sa v posledných rokoch orientuje aj na zvýšenú kvalitu materiálov. Použitie kompozitných materiálov umožňuje zvýšenie zaťažiteľnosti, resp. predĺženie zvyškovej životnosti existujúcich konštrukcií. Pri porovnaní s klasickými materiálmi sa dosahuje zmenšenie prácnosti, vyššia koróznna odolnosť a výrazné skrátenie prác.

Významný pokrok sa dosiahol najmä používaním polyménych lamiel a tkanín vystužených vláknami - FRP na zosilňovanie vodorovných i zvislých nosných prvkov. Výsledky experimentálnych prác potvrdili dobrú zhodu s teoretickými riešeniami a preto viaceré boli zaradené aj do smernice *fib* pre zosilňovanie betónových konštrukcií, resp. nových predpisov pre navrhovanie (napr. MC 2010). Na statické zosilňovanie betónových konštrukcií sa najčastejšie používajú lamely a tkaniny z polyméru vystuženého uhlíkovými vláknami - CFRP. CFRP má veľkú pevnosť, vysoký modul pružnosti a lineárne pružné chovanie až do porušenia.

Požiadavka na zosilnenie vodorovných nosných prvkov je často spojená s potrebou zvýšenia odolnosti zvislých prvkov. Na tento účel sa najčastejšie používajú lamely alebo tkaniny z CFRP. Doktorand sa v práci venuje zosilňovaniu kruhových betónových stĺpov CFRP tkaninami. Aktuálnosť problematiky dokumentuje veľké množstvo výpočtových modelov a experimentov na stanovenie a overenie odolnosti ovinutých stĺpov, príspevkov vo vedeckých a odborných časopisoch a konferenciách, ktoré boli publikované v posledných dekádach.

Hodnocení:

|                                     |                                                 |                                   |                                      |                                |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> vynikající | <input checked="" type="checkbox"/> nadprůměrné | <input type="checkbox"/> průměrné | <input type="checkbox"/> podprůměrné | <input type="checkbox"/> slabé |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|

### Splnění cílů disertační práce

Ciele dizertačnej práce sú stručne uvedené v kap. 2. Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo zhodnotenie stavu poznania v oblasti stĺpov ovinutých CFRP tkaninou, analytickými a numerickými metódami overenie teórie ovinutých stĺpov a ich porovnanie s výsledkami experimentálnych skúšok. Za týmto účelom dizertant spracoval kapitoly Základné informácie o zosilňovaní ovinutím,

Prehľad riešenej problematiky, Experimentálna časť, Teoretický popis chovania ovinutých stĺpov a Záver. Postup riešenia a dosiahnuté výsledky sú hodnotené v ďalšom odseku tohto posudku. Po preštudovaní práce som dospel k záveru, že predložená dizertačná práca splnila všetky plánované hlavne ciele.

Hodnocení:

|                                                |                                      |                                   |                                      |                                |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> vynikající | <input type="checkbox"/> nadprůměrné | <input type="checkbox"/> průměrné | <input type="checkbox"/> podprůměrné | <input type="checkbox"/> slabé |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|

### Postup řešení problému – metody zpracování

Kap. 3 sa zaoberá kompozitnými FRP materiálmi vhodnými pre zosilňovanie stĺpov ovinutím. Uvádza bežné spôsoby zosilňovania ovinutím, vybrané návrhové postupy a vývoj problematiky.

V kap. 4 sa kategorizujú výpočtové modely ovinutých stĺpov na modely získané na základe experimentálnych skúšok, resp. analytických a numerických modelov. Na doplnenie sa uvádza aj riešenie na základe vybraných predpisov a noriem.

Kap. 5 opisuje experimentálny program zameraný na objasnenie vplyvu viacerých parametrov, ktoré ovplyvňujú účinnosť ovinutia stĺpov. Pomerne rozsiahly experimentálny program začína skúškami laminovanej tkaniny v ťahu. Na sleduje experimentálne overenie krátkych a vysokých stĺpov z prostého, resp. železového betónu ovinutých CFRP tkaninou. Krátke stĺpy boli zaťažované centricky pôsobiacou tlakovou silou, vysoké stĺpy boli namáhané tlakovou silou s rôznou excentricitou. Takýmto spôsobom sa získali čiary únosnosti (interakčné diagramy) odlišne ovinutých stĺpov. Celkovo bolo vyrobených 20 krátkych 23 vysokých stĺpov (výška 2900 mm) kruhového prierezu z betónu triedy C30/37, resp. C55/67. Veľký počet vzoriek umožňuje dobrú základňu pre hodnotenie rôznych režimov zaťažovania a zosilňovania stĺpov.

V 6. kap. sú zhrnuté vlastné výsledky zistené analyticky, numerickou analýzou a experimentálnym programom a tieto sú verifikované s výsledkami experimentálnych prác zameraných na zosilnenie stĺpov kruhového prierezu ovinutím CFRP tkaninou (tab. 17). Vzhľadom k rozdielnemu namáhaniu laminovanej CFRP tkaniny pri skúške v ťahu a pri ovinutí kruhového prierezu dochádza k zmenšeniu medzného napätia. Analýzou dát z tab. 17 bola stanovená hodnota súčiniteľa účinnosti ovinutia  $k_e = 0,625$ . V tejto časti je odvodený aj vzorec pre stanovenie pevnosti betónu ovinutého laminovanou CFRP tkaninou (47). Analyzuje sa aj vplyv štíhlosti stĺpov na účinnosť ovinutia CFRP tkaninou. Z grafov 23 a 24 je zrejmý pokles účinnosti ovinutia s narastajúcou štíhlosťou stĺpov. Pri numerickej analýze bol použitý program ATENA 3D, pričom vstupné parametre boli prevzaté z experimentálneho programu. V rámci numerickej analýzy vysokých stĺpov boli overované tieto parametre: počet vrstiev ovinutia priečnej tkaniny, vplyv ovinutia pozdĺžnou tkaninou a vplyv pevnosti betónu. V závere kap. 6 sú porovnané výsledky analytickej štúdie s výsledkami experimentálneho programu a numerického modelovania.

7. kapitola hodnotí splnenie cieľov dizertačnej práce. Na základe porovnania výsledkov experimentálnej a teoretickej časti sumarizuje získané poznatky. Potvrďuje niektoré známe poznatky o pôsobení ovinutia na krátke stĺpy a prináša aj viaceré nové poznatky z vyšetrovania vysokých stĺpov.

Hodnocení:

|                                                |                                      |                                   |                                      |                                |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> vynikající | <input type="checkbox"/> nadprůměrné | <input type="checkbox"/> průměrné | <input type="checkbox"/> podprůměrné | <input type="checkbox"/> slabé |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|

## Význam dizertační práce pro praxi a pro rozvoj vědního oboru

Jedná sa najmä o tieto prínosy pre vedný odbor:

1. V dizertačnej práci sa analyticky, numericky a experimentálne preukázala možnosť zvýšenia odolnosti stĺpov CFRP tkaninou v celej oblasti interakčného diagramu: bol preukázaný priaznivý účinok pozdĺžne orientovaných vlákien v prevažne ohýbaných prierezoch.
2. Predložený vzťah na stanovenie pevnosti ovinutého betónu v tlaku (47) spresňuje výsledky v porovnaní s platnou ČSN EN 1992-1-1.
3. Získané výsledky vedú k záveru, že pri výpočte odolnosti prierezu treba zohľadňovať postupnú aktiváciu ovinutia.
4. S nárastom pevnosti betónu klesá účinok ovinutia.

V praxi sa výsledky dizertačnej práce využijú predovšetkým pri návrhu zosilňovania stĺpov. Ovinutie stĺpov jednosmernou tkaninou v smere kolmo na pôsobiacu tlakovú silu nájde uplatnenie najmä v prevažne tlačných prierezoch. Technické listy viacerých výrobcov CFRP tkaniny uvádzajú pevnostné a deformačné vlastnosti nielen „suchej“ tkaniny ale aj laminátu. Použitím v práci uvedených princípov stanovenia únosnosti, vzťahov a koeficientov pre ovinutý betón sa spresní a uľahčí návrh a overenie zosilnenia.

V kap. 7 sa uvádzajú viaceré odporúčania pre ďalší výskum v oblasti zosilňovania stĺpov ovinutím FRP tkaniny. Okrem v práci uvedených odporúčaní možno vytipovať aj ďalšie témy, ako napr. kombináciu priečneho ovinutia tkaninou a pozdĺžnej lamely lepenej na povrch alebo v drážke (NSMR).

Hodnocení:

|                                     |                                                 |                                   |                                      |                                |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> vynikající | <input checked="" type="checkbox"/> nadprůměrné | <input type="checkbox"/> průměrné | <input type="checkbox"/> podprůměrné | <input type="checkbox"/> slabé |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|

## Formální úprava dizertační práce a její jazyková úroveň

Práca je z formálneho hľadiska na veľmi dobrej úrovni. Literárne poznatky sú napísané v logickom slede a prehľadne, s citáciami referencií. Použité obrázky výrazne prispievajú k celkovej úrovni dizertačnej práce. Dizertant ovláda odbornú terminológiu, čo vďačí zrejme aj bohatej publikačnej činnosti.

Autoreferát dizertačnej práce spĺňa všetky požadované kritéria, pričom výstižne informuje o stave riešenej problematiky, postupe a výsledkoch získaných z experimentálnych prác a porovnávacej analýzy.

Hodnocení:

|                                     |                                                 |                                   |                                      |                                |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> vynikající | <input checked="" type="checkbox"/> nadprůměrná | <input type="checkbox"/> průměrná | <input type="checkbox"/> podprůměrná | <input type="checkbox"/> slabá |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|

## Hodnocení publikační a jiné činnosti doktoranda

Výsledky svojej výskumnej a odbornej činnosti dizertant publikoval ako autor, resp. spoluautor v 34 príspevkoch na konferenciách a v odborných časopisoch, z toho 12 v anglickom jazyku (9x SCOPUS a 2x WoS). Navyše sa podieľal na vývoji štyroch funkčných vzoriek, jedného úžitkového vzoru produktov a jednej certifikovanej metodiky.

Hodnocení:

|                                     |                                                 |                                   |                                      |                                |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> vynikající | <input checked="" type="checkbox"/> nadprůměrná | <input type="checkbox"/> průměrná | <input type="checkbox"/> podprůměrná | <input type="checkbox"/> slabá |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|

## Poznámky a pripomínky k text u práce

K predloženej práci mám tieto vecné pripomienky:

- str. 65, 69, 78 a ďalej: sa uvádza, že skúšky materiálov prebiehali v silovom režime s konštantným nárastom ťahovej sily. Pri tomto režime skúšok nemožno zaznamenať klesajúcu vetvu pracovného diagramu ( $\sigma-\epsilon$ ).
- str. 77: Maximálna vzdialenosť priečnej výstuže v stĺpoch nemá byť väčšia ako 15 násobok priemeru pozdĺžnych prútov (STN EN 1992-1-1 NA), t. j.  $15 \times 5 = 120$  mm, stúpanie skrutkovice je 150 mm (priemer vzorky 200 mm).
- str. 90: konštatujú sa značné rozdiely v únosnostiach, napr. na 3xovinutom stĺpe S30\_16\_N sa neprejavilo zvýšenie únosnosti. Boli takéto vzorky vyradené?
- str. 123 až 126: bolo by vhodné parametrizovať hodnotu súčiniteľa  $k_e$  ako funkciu priemeru ovinutia.
- str. 156: uvádza sa, že účinok pozdĺžne orientovanej tkaniny sa prejavil až v oblasti s výrazným ohybovým namáhaním. Z grafu 31 je možné zistiť, že najväčší prírastok sily  $F$  bol zaznamenaný pri  $e = 0$  (aj keď sa jednalo o krehké porušenie)

K predloženej práci mám tieto formálne pripomienky:

- str. 25: vzorec (7) treba opraviť; hodnoty na zvislej osi na obr. 5 nie sú v GPa ale MPa
- str. 44 a ďalej: pre vzorky výšky 210 odporúčam používať zaužívaný názov valcové vzorky, pre vzorky výšky 380 mm odporúčam zjednotiť označenie „krátke stĺpy“ namiesto „masívne stĺpy“, ako to je používané na str. 69 a ďalej.
- str. 49 a ďalej: odporúčam namiesto výrazu „parabolicko-rektangulárny“ diagram používať „parabolicko-obdĺžnikový“ diagram
- str. 87, riadok 4: zrejme sa jedná o „vodorovne“ pôsobiacu silu v polovine výšky...
- str. 130, riadok 6: zrejme sa jedná („vodorovný“ priehyb)
- str. 154 a ďalej: v texte sa občas vyskytujú odvolávky na nesprávne čísla grafov (napr. na str. 154 má byť odvolávka na graf 30)
- str. 180, tretia odrážka od hora: ... zodpovedajúca časť tkaniny je zrejme „rozťahovaná“ v miestach ťahanej časti prierezu...

Uvedené vecné a formálne pripomienky uvádzané v posudku neznižujú kvalitu predloženej práce, je vhodné ich zväžiť pri publikovaní častí dizertačnej práce.

## Záver

Záverom konštatujem, že vypracovaním predloženej dizertačnej práce preukázal Ing. Vojtěch Kostihra potrebné teoretické vedomosti, ako aj znalosť vedeckých metód výskumu.

Uchádzač spracovaním dizertačnej práce „Zesilování železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou“ preukázal spôsobilosť k samostatnej tvorivej vedeckej práci v zmysle § 47 zákona č. 111/1998 Zb. o vysokých školách a zmenách a doplnení ďalších zákonov.

Odporúčam, aby dizertačná práca „Zesilování železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou“ bola prijatá k obhajobe a aby v prípade jej úspešného obhájenia bol

Ing. Vojtěchovi Kostihovi

udelený akademický titul „doktor“ (v skratke „Ph.D.“ uvádzané za menom).

Dátum: 23. apríla 2018

Podpis oponenta: 